Natuurkunde basis

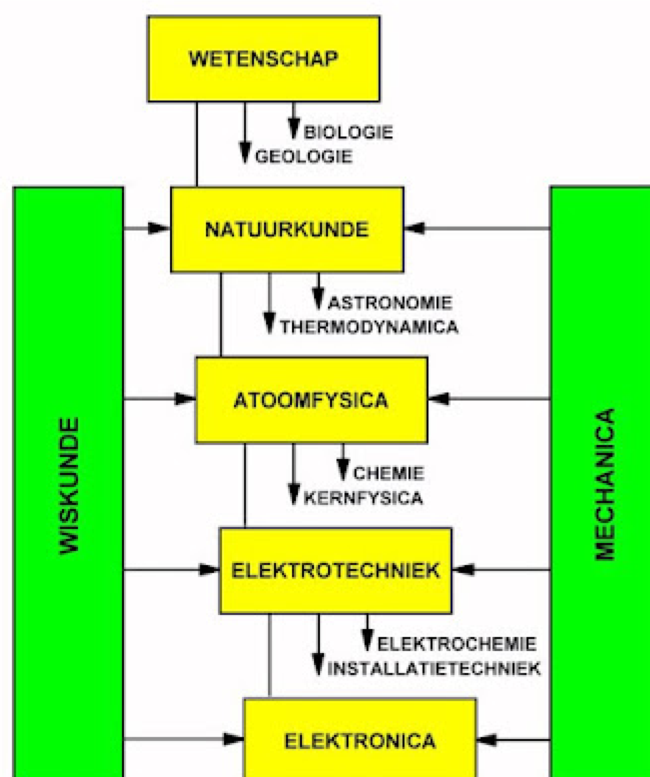
Elektronica is een tak van de natuurkunde en onderworpen aan strenge wiskundige wetten en fysische regels. Natuurkunde is een onderdeel van de wetenschap. Het is interessant om te onderzoeken waar de elektronica in het heel brede gebied van de wetenschap thuis hoort. In dit artikel worden nadien de fundamentele begrippen uit de natuurkunde en de mechanica, die iedere elektronicus als algemene kennis nodig heeft, in het kort toegelicht. Wij bespreken de fundamentele grootheden, hun eenheden en hun wiskundige onderlinge verbanden.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 18-03-2017

De wetenschap verzamelt menselijke kennis

De piramide van kennis
Aan de top van de '*piramide van kennis*' staat uiteraard de wetenschap. Wetenschap is te definiëren als de complete verzameling van systematisch verkregen objectieve menselijke kennis. Dat is uiteraard een heel breed terrein en omvat onder andere:

- Biologie, de wetenschap van de levende organismen.
- Geologie, de wetenschap van het ontstaan en de evolutie van de aarde.
- Natuurkunde, de wetenschap die zich bezig houdt met het ontrafelen, begrijpen en ondubbelzinnig definiëren van de structuur van de natuur.



De natuurkunde
De natuurkunde kan weer opgesplitst worden is kennisgebieden zoals:

- Astronomie, de tak van de natuurkunde die de objecten in de ruimte bestudeert.
- Thermodynamica, bestudeert interacties tussen verzamelingen van deeltjes op macroscopisch niveau.
- Atoomfysica, houdt zich bezig met de opbouw van de atomen en hun elektronenschillen en met de onderlinge wisselwerking van atomen en ionen.

De atoomfysica
Ook die tak van de natuurkunde kan echter weer in diverse specialismen gesplitst worden:

- Chemie of scheikunde, die de bindingen bestudeert die atomen met elkaar kunnen aangaan en alles wat uit deze verbindingen ontstaat.
- Kernfysica, die de bewegingen en interacties tracht te begrijpen van de deeltjes die zich in de kern van ieder atoom bevinden.
- Elektrotechniek, onderzoekt de eigenschappen van elektronen die uit hun normale atoomverband zijn gestoten. Of, met andere woorden, met de eigenschappen van vrije elektronen die door geleiders en halfgeleiders vloeien en als gevolg elektrische stromen opwekken. Omdat bewegende elektronen een magnetisch veld veroorzaken is het begrip 'magnetisme' onlosmakelijk verankerd in de elektrotechniek.

De elektrotechniek
De elektrotechniek heeft weer verschillende takken:

- Elektrochemie, die zich bezighoudt met de manier waarop vrije elektronen door waterachtige vloeistoffen stromen en batterijen en accu's vormen.
- Installatietechniek, onderzoekt de manier waarop vrije elektronen massaal door geleiders verplaatst worden, zoals in elektrische centrales, hoog- en laagspanningsnetten, motoren en lampen.
- Elektronica, de tak van de elektrotechniek die onderzoekt hoe een kleine stroom van vrije elektronen een tweede stroom van vrije elektronen kan opwekken, al dan niet versterkt of verzwakt. Of, met andere woorden, hoe u de eigenschappen van vrije elektronen kunt gebruiken om elektrische stromen te manipuleren.

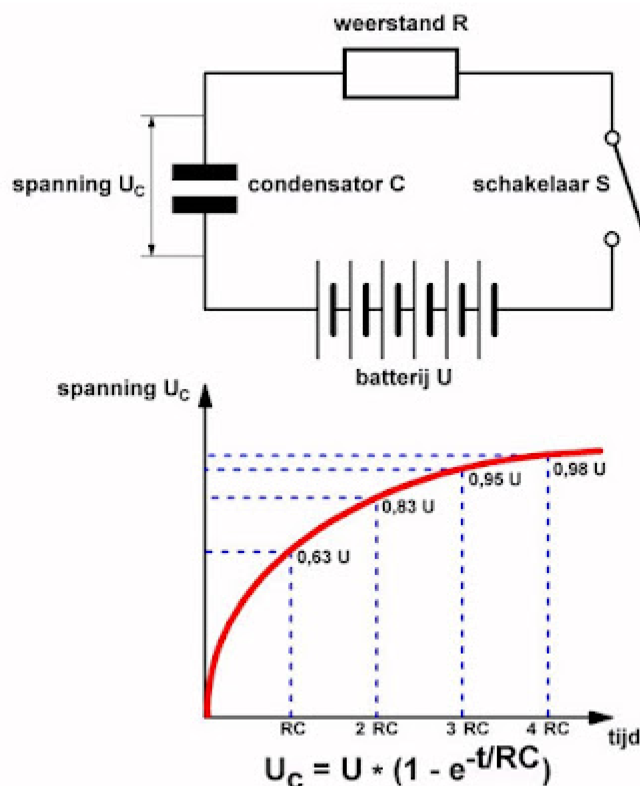
Terug naar de roots
Als u denkt dat u alle verschijnselen uit het blokje 'elektronica' kunt verklaren zonder terug te grijpen naar zaken die in vorige blokjes thuis horen, dan hebt u het mis. Voor de verklaring van een voor de elektronica zeer fundamenteel begrip als 'vrije elektronen' moet u terug naar het blokje 'atoomfysica'. Voor de verklaring van het begrip 'magnetisch veld' moet u terug naar het blokje 'elektrotechniek'.

Mechanica en wiskunde spelen een grote rol

Mechanica bestudeert alles dat beweegt
Rechts naast de besproken blokjes staat een groot blok 'mechanica'. Mechanica houdt zich bezig met het begrijpen en definiëren van voorwerpen die in beweging zijn. Omdat zowat alles in de natuur op de een of andere manier in beweging is zal het duidelijk zijn dat de mechanica een zeer breed terrein bestrijkt en van toepassing is op vrijwel alle besproken takken van de wetenschap.

Wiskunde perst alle verschijnselen in een exact keurslijf
Links naast de besproken blokjes is een groot blok 'wiskunde' getekend. Wie het woord natuurkunde ziet denkt onvermijdelijk aan schoolborden vol ingewikkelde wiskunde. Terecht, want de wiskunde speelt een belangrijke rol in het formuleren van de wetten van de natuurkunde, mechanica en elektrotechniek. Zelfs zo'n belangrijke rol dat bepaalde zogenaamd alledaagse begrippen, zoals een magnetisch veld of een elektromagnetische golf, in feite alleen wiskundig te formuleren zijn.

Een voorbeeld van het belang van de wiskunde
Als u een condensator C van 1 μF via een weerstand R van 1 kΩ oplaadt uit een spanningsbron U van 10 V, dan zal de spanning Uc over de condensator volgens een welbepaald verloop stijgen in functie van de laadtijd. Dat verloop is exact te omschrijven in een wiskundige formule. Als u deze wiskundige formule gevonden hebt, is het vanaf dat moment niet meer nodig experimenteel te bepalen hoe groot de spanning na 2 seconden over een condensator van 4,7 μF zal zijn als die wordt geladen via een weerstand van 330 kΩ uit een spanningsbron van 65 V. Het volstaat deze nieuwe waarden in de formule in te vullen en u kunt het antwoord op de vraag volgens een zuiver wiskundige manier berekenen, zonder één meting te verrichten.



Het opladen van een condensator. (© 2017 Jos Verstraten)

Determinisme
Men noemt het hele gebied van de klassieke natuurkunde daarom 'deterministisch'. Als u de beginvoorwaarden voor het tot stand komen van een bepaald verschijnsel kent en u weet de wiskundige formules waaraan dat verschijnsel voldoet, dan weet u voldoende om de resultaten van het verschijnsel te kunnen berekenen. Gebeurtenissen in de natuurkunde en dus ook in de elektronica volgen altijd uit hun beginvoorwaarden en uit hun wiskundige formules. Alle gebeurtenissen zijn als het ware volledig voorbestemd, dus deterministisch.

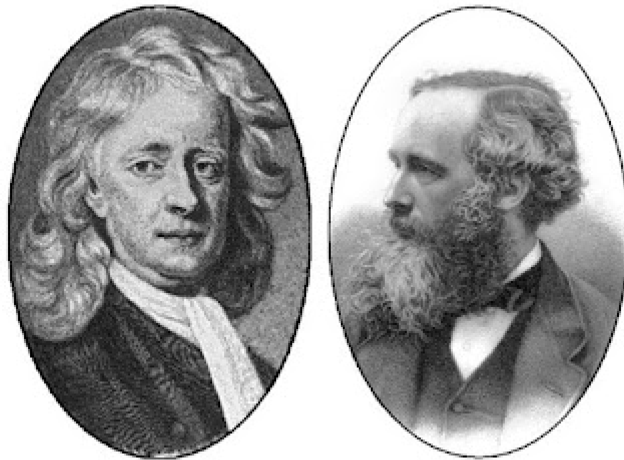
De klassieke mechanica versus de quantummechanica

Klassieke mechanica

In het overzicht van de eerste afbeelding staat bij het rechter blokje het woord 'mechanica'. Dat is een vrij onnauwkeurige benaming, omdat er op dit moment twee soorten mechanica bestaan. De eerste noemt men de 'klassieke mechanica'. Dat is de kennis van de mechanica zoals die rond 1900 bestond. Deze klassieke mechanica is samengesteld uit:

- De theorieën over de aantrekkingskracht tussen lichamen, in 1685 door Isaac Newton opgesteld.
- De theorieën over het elektrisch en magnetisch veld, rond 1860 door James Clerk Maxwell op papier gezet.

Beide theorieën geven een uitstekende verklaring en een volledig deterministische wiskundige beschrijving van de eigenschappen van de mechanica die op aardse schaal waar te nemen zijn. Maar verlegt u het onderzoeksterrein naar het hele kleine (kernfysica) of naar het hele grote (astronomie), dan blijkt dat deze klassieke mechanica bepaalde verschijnselen niet kan verklaren. Om een voorbeeld te noemen, het is met de klassieke mechanica absoluut onmogelijk om te verklaren waarom elektronen alleen in bepaalde banen rond de atoomkern kunnen draaien.



Newton en Maxwell. (© Wikimedia Commons)

Quantummechanica
Tussen de jaren 1910 en 1940 werd daarom een nieuw soort mechanica ontwikkeld, die algemeen 'quantummechanica' wordt genoemd. Deze theorie kon ontstaan doordat Einstein met zijn beroemde 'relativiteitstheorie' de weg had geëffend om op een heel andere manier over natuurkundige verschijnselen na te denken.



Einstein. (© Wikimedia Commons)

Einde van het determinisme?
Een van de voornaamste ontdekkingen van de quantummechanica is dat verschijnselen op zeer kleine schaal absoluut niet deterministisch zijn. Volgens de quantummechanica is het bijvoorbeeld onmogelijk om de plaats van een elektron dat rond een atoomkern draait nauwkeurig te bepalen. U kunt hoogstens de plaats berekenen waarop u de meeste kans hebt dat elektron aan te treffen. Dat wil overigens niet zeggen dat daarmee het determinisme

van de klassieke mechanica niet meer geldig is. Bij verschijnselen op aardse schaal hebt u te maken met bewegingen van miljarden en miljarden elektronen tegelijk. Het niet te voorspellen gedrag van ieder elektron afzonderlijk wordt in die veelheid van deelnemende deeltjes als het ware gemiddeld, zodat het gedrag van alle deeltjes samen wél deterministisch beschreven kan worden. U zou dus kunnen besluiten dat de wiskundige formules van de klassieke mechanica de aan zekerheid grenzende waarschijnlijkheid beschrijven dat de deeltjes zich gaan gedragen zoals de wiskundige formules voorschrijven.

Materie versus golven
Een tweede belangrijke ontdekking van de quantummechanica is dat het fundamenteel verschil dat de klassieke mechanica maakt tussen 'materie' en 'golven' niet terecht is. Materie en golven zijn beide uitingen van een en hetzelfde fundamenteel verschijnsel, dat u het best kunt omschrijven met de term 'energie'. Dit is het 'dualiteitsbeginsel' van het heelal. Soms uit die energie zich onder de vorm van deeltjes met massa en afmetingen, soms onder de vorm van golven met golflengte en frequentie. Dat betekent dus dat een verschijnsel, stel licht, zich zowel onder de vorm van deeltjes als onder de vorm van een golfverschijnsel kan manifesteren.

Een zonnecel als voorbeeld
In de elektronica wordt u vaak geconfronteerd met dit dualistisch karakter van licht. Voor een zonnecel zit een lens om het zonnelicht te concentreren op het gevoelig oppervlak van de cel. Die lens werkt doordat het licht zich voordoet onder de vorm van golven, die afgebogen wordt door de brekingsindex van de lens. Uit die breking volgt een samenbundeling van de golven in het brandpunt van de lens. Maar als het licht op het gevoelig oppervlak van de zonnecel valt zijn het opeens de fotonen, de lichtdeeltjes, die dank zij hun energie elektronen door de sperlaag van de zonnecel kunnen schieten en daardoor een spanning over de zonnecel opbouwen! Bij het bestuderen van de werking van een zonnecel met bundellens moet u dus zowel een beroep doen op licht als golfverschijnsel als op licht als deeltjesverschijnsel.

Quantummechanica in de elektronica

Waarom moeilijk doen als het ook gemakkelijk kan?
De gevolgen van de quantummechanica op het filosofisch denken over de natuur zijn erg groot en zelfs nu nog steeds volop in discussie. Voor de dagelijkse elektronicapraktijk maakt het echter niets uit. In de elektrotechniek en elektronica wordt steeds gesproken over elektronen alsof dat onvoorstelbaar kleine knikkertjes harde stof zijn, die door geleiders en halfgeleiders stromen. Hoewel u, dank zij de quantummechanica, nu weet dat dit een veel te eenvoudige kijk op de werkelijkheid is, kunt u met deze vereenvoudigde voorstelling vrijwel alle elektrische en elektronische schema's verklaren. Waarom dus moeilijk doen als het ook gemakkelijk kan?

Zonder quantummechanica zou er geen moderne elektronica bestaan
Daarmee mag echter niet gezegd worden dat de theorieën die door de quantummechanica zijn ontwikkeld van geen belang zijn voor de elektronica. Wel integendeel! Moderne elektronische onderdelen zoals masers, lasers, chips en zelfs de alledaagse ledlampen zouden niet ontwikkeld zijn zonder dat de quantummechanica de technici een grondig beeld had geschonken over hoe het interne van een atoom echt in elkaar zit.

Halfgeleider vastestoffysica
Er is zelfs een speciale tak van de natuurkunde ontwikkeld die men 'halfgeleider vastestoffysica' noemt. Deze volledig op de quantummechanica geënte wetenschap houdt zich bezig met het natuurkundig verklaren van de werking van in feite alledaagse elektronische onderdelen zoals halfgeleiders, zonnecellen, leds, etc.

Grootheden en hun eigenschappen

Definitie van grootheid
Zuiver natuurkundige bekeken is een grootheid een eigenschap die kwantificeerbaar is, zoals massa, temperatuur of afstand. Als u op uw thermometer in uw tuin ziet dat het 15 °C is, dan begrijpt iedereen wat u gemeten hebt. De grootheid 'temperatuur' wordt hierbij cijfermatig uitgedrukt in een eenheid '°C' of 'graden celsius'. Hiermee is de temperatuur in uw tuin ondubbelzinnig vastgesteld, er kunnen geen meningsverschillen over ontstaan. Maar daarvoor is het nodig dat er overeenstemming bestaat over de gebruikte eenheid.

De eenheid van grootheden
In de praktijk van de natuurkunde is het ondubbelzinnig meten en definiëren van grootheden van fundamenteel belang. Een Amerikaanse natuurkundige die het kookpunt van een vloeistof bepaalt, moet dezelfde temperatuur meten als zijn Europese beroepsgenoot. Onder het meten van een grootheid verstaat men deze grootheid vergelijken met een soortgelijke grootheid, die men tot eenheid heeft gekozen. Zo heeft men eeuwen lang voor de eenheid van afstand de lengte genomen van een bepaalde staaf metaal die in Frankrijk werd bewaard. Deze eenheid werd 'de meter' genoemd. Op deze manier was iedereen in staat zijn of haar eigen eenheid van lengte te ijken op deze internationale standaard, de meter.

Grootheden te kust en te keur
Er bestaan uiteraard ontelbare grootheden. Alleen in de elektrotechniek kunt u zonder diep na te denken meer dan tien grootheden opnoemen:

- Capaciteit met als eenheid de farad (F).
- Elektrische geleidbaarheid met als eenheid de siemens (S).
- Frequentie met als eenheid de hertz (Hz).
- Golflengte met als eenheid de meter (m).
- Lading met als eenheid de coulomb (Q).
- Magnetische flux met als eenheid de weber (Wb).
- Magnetische Reluctantie met als eenheid de ampère-winding per weber (aw/Wb).
- Spanning met als eenheid de volt (V).
- Stroom met als eenheid de ampère (A).
- Veldsterkte met als eenheid volt per meter (V/m).
- Vermogen met als eenheid de watt (W).
- Weerstand met als eenheid de ohm (Ω).
- Zelfinductie met als eenheid de henry (H).

Zeven fundamentele grootheden
Al deze grootheden hebben uiteraard een eigen eenheid, maar het is in de praktijk een vrijwel onmogelijke klus om voor al deze eenheden internationale standaarden af te spreken. Dank zij de wiskunde hoeft dat niet. Men heeft kunnen aantonen dat er slechts zeven fundamentele grootheden bestaan, waaruit alle overige grootheden wiskundig afgeleid kunnen worden.

- Lengte met als eenheid de meter (m).
- Massa met als eenheid de kilogram (kg).
- Tijd met als eenheid de seconde (s).
- Elektrische stroom met als eenheid de ampère (A).
- Temperatuur met als eenheid de graad kelvin (°K).
- Hoeveelheid materie met als eenheid de mol (mol).
- Lichtsterkte met als eenheid de candela (cd).

De symbolen van grootheden
Naast eenheden hebben grootheden ook nog symbolen. Dat zijn de afkortingen, waarmee zij

in wiskundige formules worden voorgesteld. De vijf fundamentele grootheden hebben de onderstaande symbolen.

- Lengte: s.
- Massa: m.
- Tijd: t.
- Elektrische stroom: I.
- Temperatuur: T.
- Hoeveelheid materie: N.
- Lichtsterkte: I_v.

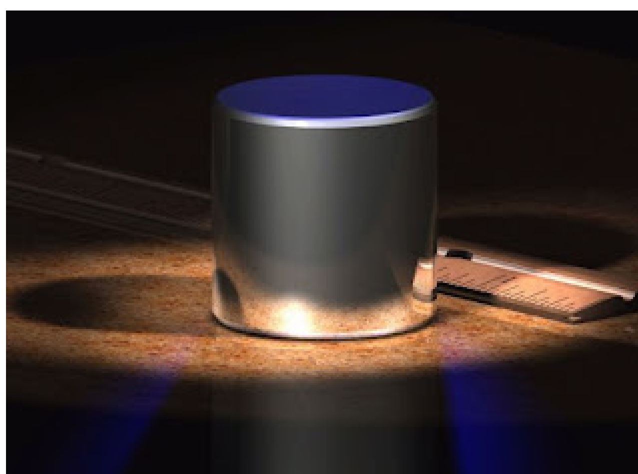
Het internationale MKS-stelsel
Het groothedenstelsel dat van deze zeven basisgrootheden is afgeleid noemt men het 'internationale MKS-stelsel' naar de eerste letters van de drie oudste fundamentele eenheden meter, kilogram en seconde. In de techniek wordt hiervoor nog vaak het verouderde woord 'Giorgistelsel' gebruikt.

De eenheden van de basisgrootheden

De seconde
De seconde is de duur van 9.192.631.770 trillingen van de straling die wordt uitgezonden tussen twee bepaalde energieniveaus van een atoom $Cesium^{133}$.

De meter
De meter is gelijk aan de afstand die het licht in het luchtledige aflegt in $^{1}/_{299.792.458}$-ste deel van een seconde.

De kilogram
De kilogram is de massa van een bepaalde cilinder, gemaakt van platina-irridium, die wordt bewaard te Sèvres in Frankrijk. De kilogram is de enige ijkwaarde die is afgeleid van een door de mens gemaakt voorwerp in plaats van een natuurkundige eigenschap. Het is ook de enige ijkwaarde die een voorvoegsel (kilo) in de naam heeft staan.



De standaard kilogram. (© Greg L, Wikimedia Commons)

De ampère
De ampère is de stroom die door twee op een afstand van 1 m parallel gespannen draden vloeit en die tussen de draden een aantrekkingskracht van $2 \cdot 10^{-7}$ newton per meter lengte veroorzaakt. Als er in uw huis een elektrische stroom van 1 A wordt afgenomen van het net, dan betekent dit dat u ongeveer 230 W vermogen verbruikt, oftewel zes gloeilampen van 40 W laat branden.

De graad kelvin
De graad kelvin is het $^{1}/_{273,16}$-de deel van de tripeltemperatuur van zuiver water. Het tripelpunt is de toestand waarbij water tegelijkertijd voorkomt in zijn drie aggregatietoestanden: vast (ijs), vloeibaar (water) en gasvormig (waterdamp). Alweer zo'n weinig tot de verbeelding sprekende definitie, maar 0 °K komt overeen met -273,15 °C. Dat is de allerlaagste temperatuur die in het heelal kan voorkomen.

De mol
Een mol is de hoeveelheid materie van een bepaalde stof die evenveel deeltjes bevat als er atomen zijn in 12 gram koolstof^{12}. Het aantal deeltjes in zo'n ene mol is gelijk aan niet minder dan 6,022.14 • 10^{23}.

De candela
De candela geeft aan hoeveel licht zich bevindt in een oppervlak van een lichtbundel. Eén candela is gelijk aan de lichtsterkte in een bepaalde richting uitgestraald door een bron die licht van één kleur uitzendt met een frequentie van 540 • 10^{12} Hz en waarvan de stralingssterkte in die richting 1/683 W per standaard ruimtehoek is. Zegt u dat niets? Misschien dit dan wél: één candela komt ongeveer overeen met de lichtstrekte van een kaars.

Kan het niet wat gemakkelijker?
Het valt op dat zes van de zeven eenheden van de basisgrootheden niet op de allergemakkelijkste manier zijn gedefinieerd. Dat heeft historische achtergronden. Deze fundamentele grootheden zijn al eeuwenlang bekend. De eenheden werden in die tijd vrij willekeurig toegekend, zo goed als dat kon met de toen ter beschikking staande meettechnieken. Bij het herdefiniëren van deze eenheden in het internationale eenhedenstelsel was het natuurlijk zaak definities te vinden die in een modern laboratorium goed reproduceerbaar zijn maar die bovendien precies dezelfde waarden opleverden als de oude definities. Het zou natuurlijk beter zijn geweest om zeven geheel nieuwe definities op te stellen die veel eenvoudiger zijn. Maar dat zou tot gevolg hebben dat men overal in de wereld alle natuurkundige grootheden opnieuw zou moeten omrekenen met de nieuwe eenheden als basis. Dat zou een echte revolutie hebben ontketend, een onmogelijke opgave.

Afgeleide grootheden

De volt als voorbeeld
Alle andere grootheden noemt men afgeleide grootheden, omdat zij uit een combinatie van de fundamentele grootheden kunnen worden afgeleid. Zo zou u kunnen berekenen dat de praktische eenheid van elektrische spanning, de aan iedere elektronicus zeer bekende volt (V), ook uitgedrukt kan worden als:
1 V = 1 kgm^2/As^3

Een gemakkelijker voorbeeld is snelheid
Een ander, gemakkelijker, voorbeeld is snelheid. In het MKS-stelsel wordt snelheid uitgedrukt in de eenheid 'm/s', oftewel 'meter per seconde'. Omdat dit in het dagelijks leven een onpraktische eenheid is, werkt men meestal met de eenheid 'km/h', oftewel 'kilometer per uur'. Maar deze eenheid is uiteraard afgeleid van de MKS-eenheid:
1 km/h = 1.000 m/h = 1.000/3.600 m/s = 0,277.777 m/s
Als u met uw auto met een snelheid van 100 km/h rijdt, dan legt u 27,777 meter per seconde af. Bij 130 km/h is dat al 36,11 meter per seconde. Toch een gegeven om even stil bij te blijven staan.

Voorvoegsels of prefixen

Te groot of te klein
De meeste eenheden zijn voor de dagelijkse praktijk veel te groot of veel te klein gedefinieerd. Zo zal wel geen enkele elektronicus een condensator van 1 F in huis hebben. Nu zou u dus de waarde van een klein condensatortje in een afstemkring van uw tv kunnen schrijven als 0,000.000.000.047 F. Dat is vrij onhandig en vandaar zijn er negentien zogenoemde voorvoegsels of prefixen ingevoerd waarmee u de waarde van een eenheid kunt vermenigvuldigen.

De negentien standaard voorvoegsels

Vermenigvuldigingsfactor	Naam	Symbool	In gewone taal geschreven
1.000.000.000.000.000.000.000 = 10^{21}	zetta	Z	triljard
1.000.000.000.000.000.000 = 10^{18}	exa	E	triljoen
1.000.000.000.000.000 = 10^{15}	peta	P	biljard
1.000.000.000.000 = 10^{12}	tera	T	biljoen
1.000.000.000 = 10^{9}	giga	G	miljard
1.000.000 = 10^{6}	mega	m	miljoen
1.000 = 10^{3}	kilo	k	duizend
100 = 10^{2}	hecto	h	honderd
10 = 10^{1}	deca	da	tien
0,1 = 10^{-1}	deci	d	een tiende
0,01 = 10^{-2}	centi	c	een honderdste
0,001 = 10^{-3}	milli	m	een duizendste
0,000.001 = 10^{-6}	micro	µ	een miljoenste
0,000.000.001 = 10^{-9}	nano	n	een miljardste
0,000.000.000.001 = 10^{-12}	pico	p	een biljoenste
0,000.000.000.000.001 = 10^{-15}	femto	f	een biljardste
0,000.000.000.000.000.001 = 10^{-18}	atto	a	een triljoenste
0,000.000.000.000.000.000.001 = 10^{-21}	zepto	z	een triljardste
0,000.000.000.000.000.000.000.001 = 10^{-24}	yokto	y	een quadriljoenste

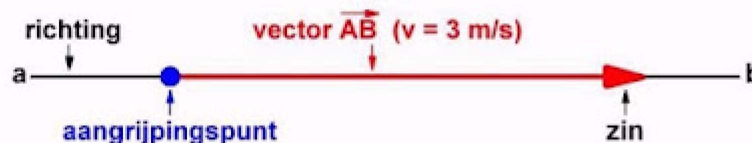
Voorbeelden
1 cm = 0,01 m = een honderdste meter
1 µF = 0,000.001 F = een miljoenste farad
1 MΩ = 1.000.000 Ω = een miljoen ohm

1 fm = 0,000.000.000.000.001 m = een biljardste meter

Scalaire contra vectoriële grootheden

Scalaire grootheden
De meeste grootheden zoals massa, temperatuur en tijd kunnen volledig gedefinieerd worden door hun waarde en hun eenheid. Als u beweert dat een bepaald lichaam een massa van 1,24 kg heeft, dan is de massa van dat lichaam daardoor volledig vastgelegd, geen discussie mogelijk. Dergelijke grootheden noemt men 'scalaire' grootheden.

Vectoriële grootheden
Bij sommige grootheden zoals bijvoorbeeld snelheid, ligt dat anders. Snelheden hebben namelijk niet alleen een waarde in m/s, maar ook een richting waarin zij werken. Bovendien hebben zij een aangrijpingspunt en een zin. Een grootheid die wordt gedefinieerd door een waarde, een richting, een zin en een aangrijpingspunt noemt men een 'vectoriële' grootheid.



Voorstelling van een vectoriële grootheid. (© 2017 Jos Verstraten)

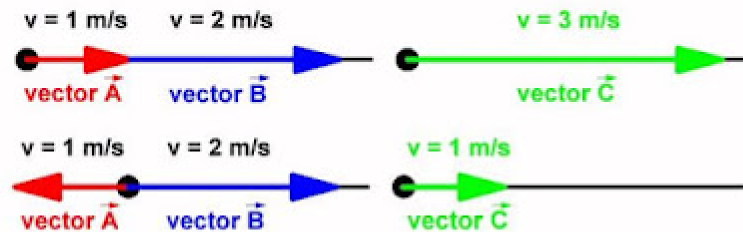
Een vectoriële grootheid wordt voorgesteld door een pijl, waarvan de lengte de waarde van de grootheid geeft. De pijl geeft de zin van de grootheid en de richting van het lijnstuk waarop de vector ligt geeft de richting waarin de grootheid werkt. Het niet van een pijlpunt voorziene uiteinde van de pijl geeft het aangrijpingspunt. In de illustratie is het blauwe bolletje het aangrijpingspunt van de snelheidsvector. De lengte AB geeft de waarde van de vectoriële grootheid, de pijlpunt geeft de zin aan (van links naar rechts) en de lijn ab de richting (in dit geval horizontaal). Om aan te geven dat er een vector in het spel is, wordt er boven de naam of de lengte van de vector een klein pijltje gezet.

Rekenen met grootheden

Rekenen met scalaire grootheden
Scalaire grootheden kunnen bij elkaar opgeteld of van elkaar afgetrokken worden. Als u een helikopter ziet op een hoogte van 100 meter en uit deze helikopter hangt een hijskabel van 40 meter lengte, dan is het duidelijk dat de haak van die kabel op een hoogte van 60 meter hangt. Bij vectoriële grootheden ligt dat iets ingewikkelder.

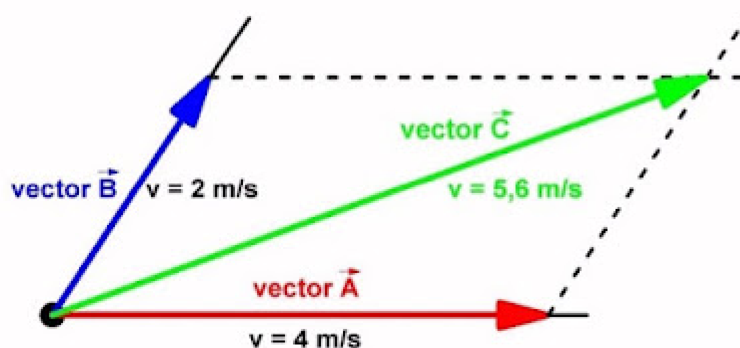
Vectoren met dezelfde richting optellen
Een van de belangrijkste bewerkingen die u op vectoren moet uitvoeren is twee vectoren bij elkaar optellen. Dat gaat niet zo gemakkelijk als bij scalaire grootheden! De som van twee vectoren is een nieuwe vector, die de resultante wordt genoemd. Als de twee vectoren hetzelfde aangrijpingspunt en dezelfde richting hebben, dan is er geen probleem. In het bovenste voorbeeld werken twee snelheidsvectoren A en B in op hetzelfde aangrijpingspunt.

Beide vectoren hebben dezelfde richting en dezelfde zin. De ene vector is 1 m/s groot, de andere 2 m/s. De resultante heeft een waarde van 3 m/s en uiteraard dezelfde richting en zin. In het onderste voorbeeld is getekend wat er gebeurt als beide vectoren een tegengestelde zin hebben. De vector A werkt men 1 m/s naar links, de vector B met 2 m/s naar rechts. De resultante is een vector met een waarde van 1 m/s, die naar rechts werkt.



Optellen van vectoren die in elkaars verlengde liggen. (© 2017 Jos Verstraten)

Vectoren met verschillende richtingen optellen
Het wordt echter iets moeilijker als de twee vectoren in verschillende richtingen aangrijpen. In het aangrijpingspunt O werken twee snelheidsvectoren in. De eerste A heeft een horizontale richting en een grootte van 4 m/s. De tweede B staat onder een hoek van 60° naar boven en heeft een grootte van 2 m/s. De resultante kan meetkundig geconstrueerd worden door met de vectoren A en B als zijden een parallellogram te tekenen. De resultante C is dan gelijk aan de diagonaal die vertrekt uit het aangrijpingspunt. Met simpele wiskundige middelen kunt u berekenen dat de waarde van de resultante gelijk is aan 5,6 m/s.

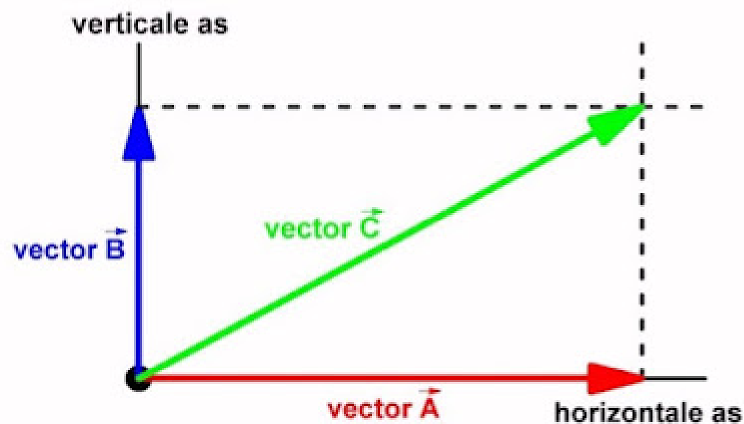


Optellen van vectoren die een hoek met elkaar maken. (© 2017 Jos Verstraten)

Een praktisch voorbeeld
U kunt dit voorbeeld vertalen naar een praktische situatie. Stel dat u een weiland bezit waar op een plek een zwaar rotsblok ligt. U wilt dit rotsblok verwijderen en spant door middel van twee stevige touwen twee tractoren in, die beide aan het blok gaan trekken. De ene tractor A vertrekt in horizontale richting met een snelheid van 4 m/s. De tweede tractor B trekt onder een hoek van 60° met een snelheid van 2 m/s. Dank zij de vectorwiskunde kunt u nu berekenen in welke richting en met wat voor snelheid het rotsblok wordt verplaatst. De snelheid van het blok bedraagt 5,6 m/s, de richting is naar C.

Ontbinden van vectoren
Een tweede belangrijke bewerking die u op vectoriële grootheden kunt uitvoeren is het ontbinden in twee deelvectoren langs de horizontale en verticale richtingen. In de illustratie is een vector C getekend, die in een bepaalde richting aangrijpt in punt O. Deze vector kan ontbonden worden in twee deelvectoren A en B, die verlopen volgens de loodrechte

richtingen a en b. Het volstaat een rechthoek te tekenen, waarbij de vector C de diagonaal vormt en de twee componentvectoren A en B de twee aansluitende zijden. Door het ontbinden van vectoren in een horizontale en verticale component kunt u ingewikkelde vectorberekeningen ten zeerste vereenvoudigen.



Ontbinden van een vectoriële grootheid volgens twee richtingen.
(© 2017 Jos Verstraten)

De grootheid massa

Massa is iets anders dan gewicht
De massa van een voorwerp, met als symbool m en eenheid kilogram (kg), wordt door leken vaak verward met het gewicht van dat voorwerp. Logisch, want in het dagelijkse spraakgebruik worden massa en gewicht beide uitgedrukt in kilogram, hetgeen zuiver wetenschappelijk bekeken absolute onzin is. Massa en gewicht zijn namelijk twee heel verschillende grootheden. U weet ongetwijfeld dat u, als u in de ruimte in een capsule zou zitten, gewichtloos zou zijn. Toch hebt u dan nog steeds wel degelijk massa. Gelukkig maar, want anders zou er niets van u overblijven.

Definitie van massa
Massa wordt in de mechanica omschreven als een hoeveelheid materie, gedefinieerd door de dichtheid en de omvang ervan. De omvang hangt uiteraard af van de afmetingen. De dichtheid is afhankelijk van het soort atomen of subatomaire deeltjes waaruit de materie is samengesteld. Er bestaan namelijk lichte atomen, zoals waterstof maar ook zware atomen, zoals uranium. Een blok uranium heeft een veel grotere massa dan een wolk waterstofgas met dezelfde omvang. Het is logisch dat de massa van een voorwerp altijd en overal hetzelfde is.

Gewicht is een kracht, uitgeoefend op een massa
Hier op aarde presenteert de massa van een voorwerp zich onder de vorm van het gewicht. Het gewicht is echter een kracht, die op de massa wordt uitgeoefend door de aantrekkingskracht van de aarde. Vandaar dat voorwerpen ver weg in de ruimte, waar het effect van de aantrekkingskracht verwaarloosbaar klein is, wél massa, maar géén gewicht hebben. Als u op de aarde 100 kg weegt, dan weegt u op de maan slechts 16,4 kg en op mars slechts 37,9 kg. Echter, een uitstapje naar de zon is niet aan te bevelen, want op het oppervlak van deze ster zou u niet minder dan 2.796,4 kg wegen. Een en ander is het gevolg van het feit dat de aantrekkingskracht op de aarde groter is dan deze op de maan of mars, maar veel kleiner dan op de zon.

De grootheid snelheid

Beweging wiskundig beschreven
Onder snelheid, met als symbool v en met eenheid meter per seconde (m/s), verstaat men de weg die een voorwerp in beweging aflegt per tijdseenheid. Wiskundig is dat te interpreteren als snelheid is afgelegde weg gedeeld door tijd. Onder de vorm van een formule is snelheid dus te omschrijven als:
$v = s / t$
De eenheid van snelheid volgt uit deze formule inderdaad als meter per seconde.

Snelheid is een vectoriële grootheid
Zoals reeds beschreven is de snelheid een duidelijk voorbeeld van een vectoriële grootheid. Vectoriële grootheden kunnen bij elkaar worden opgeteld en van elkaar worden afgetrokken. Dat geldt dus ook voor snelheden, althans op aardse schaal.

De snelheid van het geluid
In lucht en bij een temperatuur van 20 °C bedraagt de geluidssnelheid ongeveer 343 m/s of 1.234,8 km/h. Bij droge lucht met relatief weinig waterdamp en bij een temperatuur van 0 °C bedraagt de snelheid van het geluid ongeveer 331 m/s of 1.194 km/h.

De lichtsnelheid is de allerhoogste snelheid
Uit de stelling dat snelheden opgeteld kunnen worden, kunt u afleiden dat er geen limiet op snelheid bestaat. Tóch is dat wel het geval. Uit de speciale relativiteitstheorie van Albert Einstein volgt dat de snelheid van het licht in het luchtledige de hoogste snelheid is die in ons universum kan voorkomen. Die snelheid is trouwens niet voor de poes: 299.792.458 m/s, ongeveer 300.000 kilometer per seconde of 1,08 miljard kilometer per uur. In natuurkundige formules wordt de lichtsnelheid in het luchtledige weergegeven met de letter c (van het latijnse celeritas) en dus niet met de letter v.

Waarom u bliksem en donder niet gelijktijdig waarneemt
Het enorme verschil tussen de snelheid van het licht en de snelheid van het geluid verklaart waarom u eerst een bliksemflits ziet en vaak seconden later maar eerst de donder hoort. Het licht gaat zo snel dat er in feite geen tijdverschil is tussen het moment waarop de bliksem ontstaat en het moment waarop u de bliksem waarneemt. Voor het geluid van de donder ligt dat anders. De donder ontstaat op hetzelfde moment als de bliksemflits, maar plant zich voort met een snelheid van slechts 343 meter per seconde. Als u de donder drie seconden na het zien van de bliksemflits hoort, betekent dit dat de onweerswolk waaruit de bliksemflits ontstond 3 × 343 meter, ongeveer één kilometer van u is verwijderd.

De grootheid versnelling

Toename of afname van snelheid
De versnelling van een voorwerp, met als symbool a en met eenheid m/s², is de mate van toename of afname van de snelheid per tijdseenheid. Of: versnelling is snelheid gedeeld door tijd. Wiskundig kan dit geschreven worden als:
$a = v / t$
De eenheid van versnelling is dus inderdaad meter per seconde kwadraat.

De valversnelling
Als een voorwerp van een hoogte naar het aardoppervlak valt, zal dit voorwerp niet met een constante snelheid vallen, maar zal het versnellen. De valversnelling aan het aardoppervlak ten gevolge van de zwaartekracht bedraagt ongeveer 9,81 m/s² en wordt aangeduid met het symbool g van gravitatie. Als u, om wat voor persoonlijke reden dan ook, zou besluiten van een gebouw van 45 meter hoog te springen, dan zou u al na ongeveer drie seconden te pletter storten met een snelheid van 108 km/h.

Vertraging is een negatieve versnelling
Vertraging is geen nieuwe grootheid, maar is een versnelling met een negatieve waarde.

Acceleratie van auto's
Bij voertuigen zoals auto's of speedboten wordt vaak de acceleratietijd van 0 tot 100 km/h opgegeven. Ook dát is een andere definitie van het mechanische begrip versnelling. Als uw auto in tien seconden versnelt van 0 km/h naar 100 km/h, dan heeft uw voertuig een maximale versnelling van 10.000 m/s².

De grootheid kracht

Kracht is verandering van snelheid of richting
Het begrip kracht, met als symbool F en als eenheid newton (N), is een belangrijke grootheid in de mechanica. Volgens de mechanica is kracht ieder uitwendig verschijnsel dat de oorzaak is van een bewegingsverandering van een lichaam. Als een knikker in rust is en die knikker gaat plotseling over de tafel rollen, dan kan dit alleen doordat er een uitwendige kracht is op uitgeoefend. Als een rollende knikker opeens sneller of trager gaat rollen, of van richting verandert, is ook dat een teken dat op de knikker een kracht is uitgeoefend.

Het genie Newton
Newton is de man die het begrip kracht wiskundig heeft kunnen definiëren. De kracht die op een voorwerp wordt uitgeoefend is gelijk aan het product van de massa m van het voorwerp en de versnelling a die het gevolg is van de kracht. Dat is vrij logisch. Het zal duidelijk zijn dat op een zwaarder lichaam een grotere kracht moet worden uitgeoefend om dezelfde versnelling tot gevolg te hebben. Wiskundig is kracht dus gelijk aan:
$F = m \cdot a$
De eenheid van kracht is bijgevolg kgm/s². Deze eenheid wordt de newton, met als afkorting N genoemd.

Kracht als vectoriële grootheid
Kracht is een mooi voorbeeld van een vectoriële grootheid. Krachten kunnen immers in alle mogelijke richtingen op een voorwerp inwerken. De versnelling die daarvan het gevolg is zal het voorwerp in de richting van de vector van de kracht laten bewegen.

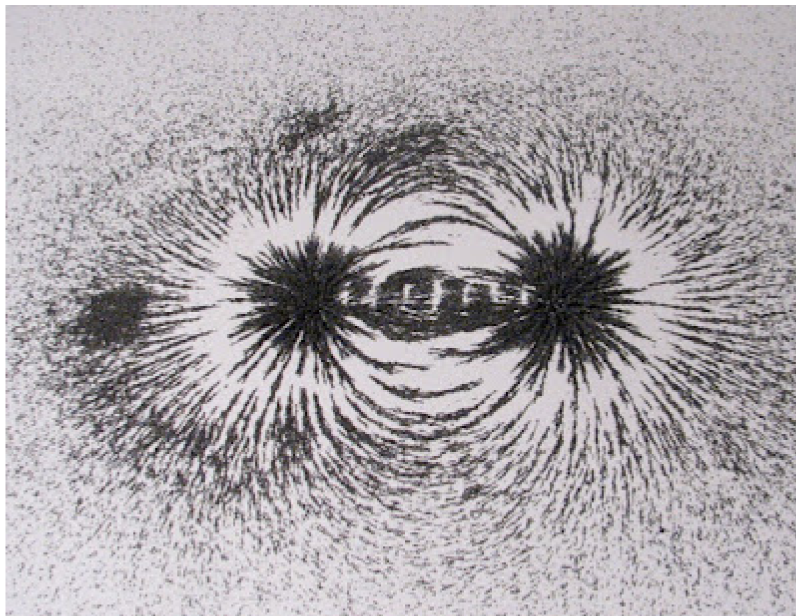
De grootheid veld

Een moeilijk voor te stellen verschijnsel
U hebt natuurlijk al vaak iets gelezen over elektrische en magnetische velden. In de klassieke mechanica kent men bovendien het begrip aantrekkingsveld van de zwaartekracht, ook wel gravitatieveld genoemd. Maar wat moet u zich bij zo'n veld voorstellen? Dat is een beetje moeilijk te omschrijven. Newton stelde dat voorwerpen elkaar aantrekken en dat hierdoor verklaard kan worden waarom voorwerpen naar het oppervlak van de aarde vallen en de aarde rond de zon blijft draaien. Maar als voorwerpen elkaar aantrekken, dan betekent dit dat zij elkaars beweging beïnvloeden en dus krachten op elkaar uitoefenen. Maar hoe was te begrijpen dat er in de lege ruimte tussen de zon en de aarde krachten zouden voorkomen? Newton noemde dit 'kracht op afstand'. Om dit enigszins te kunnen verklaren voerde hij het begrip 'veld' in. Dit veld moest worden opgevat als dat deel van de ruimte waarin een bepaalde kracht zich kon manifesteren. Rond de zon zit dus een zwaartekracht- of gravitatieveld, voorwerpen die in dit veld aanwezig zijn ondervinden de aantrekkende kracht van de zon. Over hoe dat veld er zou moeten uitzien kon men zich in die tijd niets voorstellen.

Het magnetisch veld
In de elektrotechniek doen zich vergelijkbare verschijnselen voor. Als u een sterke

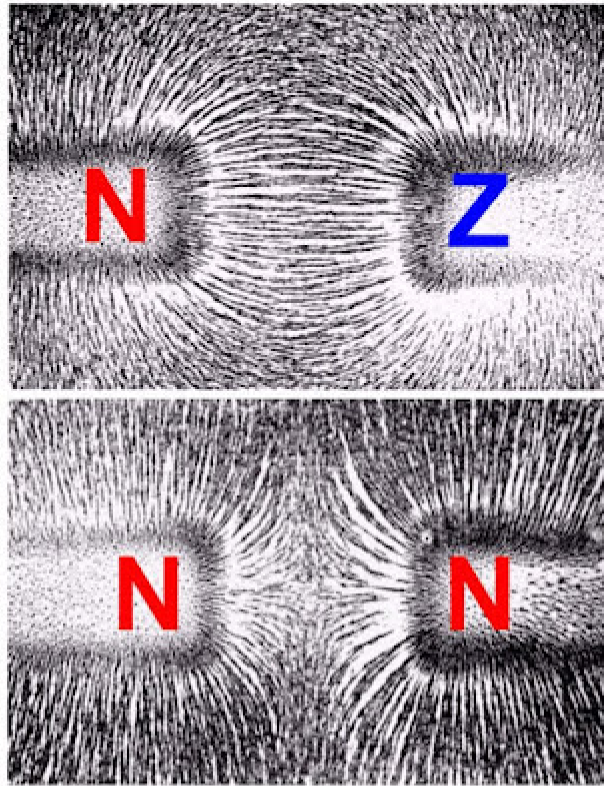
staafmagneet op een tafel bevestigt en nadien een ijzeren voorwerp in de buurt van de magneet brengt, dan voelt u heel duidelijk dat dit voorwerp wordt aangetrokken door de magneet. Het ijzeren voorwerp wil zich naar de magneet verplaatsen. Dat is een bewegingsverandering en volgens de definitie van kracht kan dit alleen veroorzaakt worden doordat de magneet kracht uitoefent op het voorwerp. Ook dit is een uiting van 'kracht op afstand'. Omdat natuurkundigen gelijksoortige verschijnselen altijd onder een en hetzelfde begrip willen samenvatten werd die magnetische kracht op afstand toegeschreven aan 'het magnetisch veld'. Dit veld is rond de staafmagneet aanwezig en heeft tot gevolg dat ijzeren voorwerpen, die in dit veld geplaatst worden, de aantrekkende kracht van de magneet ondergaan.

Zichtbaar maken van het magnetisch veld
Het vreemde is nu dat dit magnetisch veld op een heel eenvoudige manier zichtbaar is te maken. Als u een staafmagneet onder een vel karton legt en u strooit voorzichtig heel fijn ijzervijlsel op dit papier, dat zult u zien dat de korreltjes ijzer zich volgens een bepaald patroon schikken. Dit patroon is de typische verschijningsvorm van het magnetisch veld rond een staafmagneet. De duidelijk herkenbare lijnen in het patroon noemt men de 'veld- of krachtlijnen' van het magnetisch veld. Wat dat veld nu precies is weet men niet. Het is in ieder geval geen eigenschap van de tussenstof. Ook als u de magneet in een afgesloten ruimte zet en deze ruimte volledig luchtledig pompt zullen de ijzerdeeltjes zich op dezelfde manier schikken. Het veld is dus een fundamentele natuurkundige eigenschap van de lege ruimte en daar moet de mens met zijn beperkt voorstellingsvermogen het mee doen.



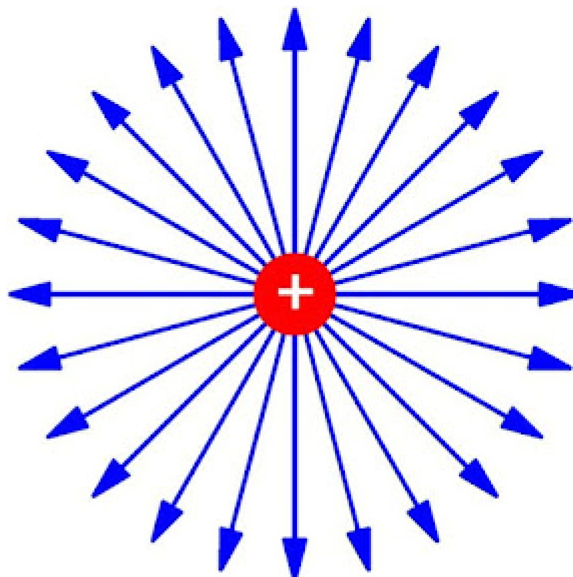
Magnetisch veld rond een staafmagneet.
(© Windell H. Oskay, Creative Commons)

Magnetische velden kunnen elkaar beïnvloeden
Als u twee identieke staafmagneten op een kleine afstand van elkaar op een tafel fixeert en het experiment herhaalt, dan ziet u dat de twee magnetische velden elkaars aanwezigheid 'voelen' en op elkaar inwerken. Zij vormen als het ware één gemeenschappelijk veld. U zult merken dat de twee magneten naar elkaar toe worden getrokken. Als u nadien een van de staafmagneten 180° draait, dan blijkt duidelijk dat de twee magnetische velden elkaar nu tegenwerken. De veldlijnen 'duwen' tegen elkaar en u merkt dat de twee magneten elkaar afstoten. Het ene uiteinde van een staafmagneet heeft dus andere eigenschappen dan het andere uiteinde. Vandaar dat men het ene uiteinde de 'noordpool' (N) noemt en het andere uiteinde de 'zuidpool' (S). Gelijknamige polen stoten elkaar af, ongelijknamige polen trekken elkaar aan.



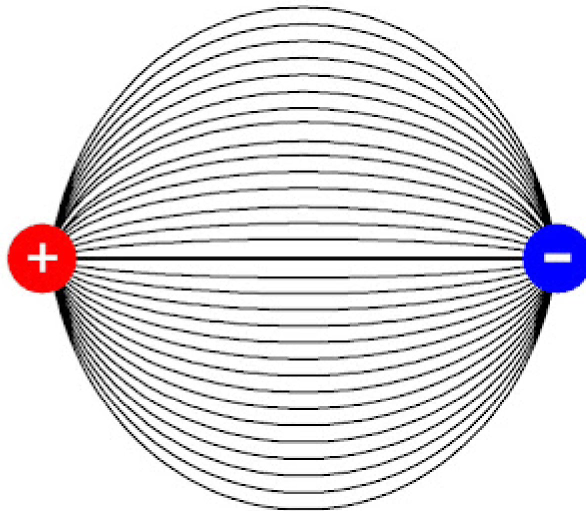
Onderlinge beïnvloeding van twee magnetische velden.
(© Wikimedia Commons)

Het elektrisch veld
Naast het gravitatieveld en het magnetisch veld bestaat er nog een derde fundamenteel natuurkundig veld: het elektrisch veld. Het was al lang bekend dat elektrisch geladen voorwerpen in staat zijn andere voorwerpen aan te trekken. Ook dit is een 'kracht op afstand' en wordt verklaard door de aanwezigheid van een elektrisch veld in de lege ruimte. Men is in staat (zij het niet zo gemakkelijk als bij een magnetisch veld) ook dit elektrisch veld zichtbaar te maken. Laadt u een kleine massa heel sterk elektrisch op, dan ontstaat een zogenoemde 'puntlading'. Rond deze puntlading is een elektrisch veld aanwezig, waarvan de krachtlijnen radiaal verlopen. Dat betekent dat zij ontspruiten uit het middelpunt van de puntlading en zich volgens de richting van de stralen van het kleine bolletje in alle richtingen door de ruimte verspreiden.



Het elektrisch veld rondom een puntlading.
(© 2017 Jos Verstraten)

Elektrische velden beïnvloeden elkaar
Ook hier blijkt dat er twee soorten ladingen bestaan: positieve en negatieve. Zet u een positief opgeladen puntlading in de buurt van een negatief opgeladen puntlading, dan ontstaat een verenigd elektrisch veld. Het radiale veld rond een positieve puntlading en het radiale veld rond een negatieve puntlading verenigen zich tot een samengesteld elektrisch veld. Uit dit verschijnsel kan verklaard worden waarom positief en negatief geladen voorwerpen elkaar aantrekken. Anderzijds zullen twee positieve of twee negatieve puntladingen elkaar afstoten, net zoals bij de N- en Z-polen van een magneet.



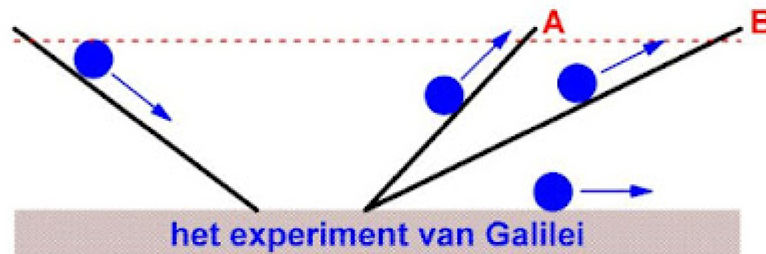
Ook elektrische velden beïnvloeden elkaar.
(© 2017 Jos Verstraten)

De grootheid arbeid

Krachten verplaatsen voorwerpen
Arbeid, met als symbool W en eenheid newtonmeter (Nm), ontstaat wanneer een kracht een voorwerp verplaatst in dezelfde richting waarin de kracht op het voorwerp wordt uitgeoefend. De hoeveelheid arbeid is zowel afhankelijk van de grootte van de kracht als van de afstand van de verplaatsing. Wiskundig kunt u dus arbeid beschrijven als:
$W = F \cdot s$
De eenheid van arbeid is bijgevolg inderdaad newtonmeter, hetgeen in het dagelijkse spraakgebruik echter de joule (J) wordt genoemd.

De grootheid energie

Galilei en zijn rollende kogels
Energiebedrijven leveren ieder huishouden 'elektrische energie'. Het begrip energie is dus een woord dat gemeengoed is geworden in het dagelijkse spraakgebruik. Ook in de elektronica wordt vaak over energie gesproken. Zo wordt in een zonnecel energie, die opgesloten zit in de straling van de zon, omgezet in elektrische energie. Maar wat in nu in feite energie en hoe kunt u dit begrip wetenschappelijk definiëren?



Mechanische definitie van het begrip energie. (© 2017 Jos Verstraten)

Om dat te begrijpen moet u terug naar het jaar 1630, toen Galileo Galilei zijn beroemde experimenten uitvoerde met rollende kogels. Galilei liet een zware loden kogel van het linker hellend vlak rollen. Nadien moest de kogel weer tegen een tweede hellend vlak oprollen, waarvan de hoek verstelbaar was. Galilei stelde vast dat de hoogte A of B, die de kogel bereikte, volledig onafhankelijk was van de helling van het tweede hellend vlak. In beide gevallen kwam de kogel tot de hoogte waarop hij op het linker vlak was losgelaten. Op de een of andere manier 'weet' de kogel dus vanaf welke hoogte hij werd losgelaten. Er blijft dus 'iets' in de kogel behouden. Dat 'iets' noemt men de energie die in de kogel ligt besloten op het moment dat hij wordt losgelaten. Volgens de wetten van de mechanica wordt energie dan ook gedefinieerd als de geschiktheid van een voorwerp om op een bepaald moment, onder gunstige omstandigheden, arbeid te leveren.

Eenheid en symbool
Omdat energie de geschiktheid van een voorwerp is om arbeid te verrichten zijn de eenheid en het symbool van energie gelijk aan deze van arbeid: de joule en W. Meestal gebruikt men echter E als het symbool voor energie.

Wet van behoud van energie
Een belangrijke, zelfs zeer fundamentele wet uit de mechanica stelt dat energie niet verloren kan gaan. Energie kan alleen van de ene in de andere vorm worden omgezet. Elektrische energie wordt in de verwarmingsspiraal van een strijkijzer omgezet in thermische energie. Dit wordt 'de wet van het behoud van energie' genoemd. Chemische energie die in een gasmengsel aanwezig is, kan vrij gemakkelijk in thermische energie worden omgezet. De totale hoeveelheid van energie gaat echter niet verloren.

Vormen van energie

Energie kan zich onder allerlei vormen uiten. De belangrijkste energie-uitingen worden in het kort besproken.

Thermische energie
Een van de belangrijkste uitingen van energie is warmte. Dit noemt men 'thermische energie'. Deze energie komt bij vrijwel ieder mechanisch proces tevoorschijn, bijvoorbeeld als gevolg van wrijving.

Mechanische energie
De kogel in het experiment van Galilei heeft 'mechanische energie'. Als u de kogel naar zijn startpositie rolt moet u arbeid verrichten. U oefent immers een kracht op de kogel uit, met als gevolg dat de kogel in de richting van de kracht gaat bewegen. Die arbeid wordt overgedragen op de kogel en geeft hem zijn mechanische energie. Het zal duidelijk zijn dat de mechanische energie van de kogel toeneemt als u hem hoger op het hellend vlak plaatst. Als de kogel in rust is in zijn uitgangspositie noemt men de energie die er in aanwezig is 'potentiële energie'. Laat u de kogel los, zodat hij naar beneden rolt, dan wordt de potentiële energie omgezet in 'kinetische energie'. Deze energie uit zich in de snelheid van de rollende kogel. Hoe sneller de kogel rolt, hoe meer kinetische energie er in de kogel aanwezig is.

Elektrische energie
Uit de verklaring van het elektrisch veld volgt dat dit veld voorwerpen die in het veld aanwezig zijn kan aantrekken. Er wordt dus een kracht op het voorwerp uitgeoefend met als gevolg dat het voorwerp in de richting van de kracht gaat bewegen. Er wordt arbeid verricht. Vandaar dat men zegt dat in een elektrisch veld 'elektrische energie' aanwezig is. Het veld is in staat arbeid te verrichten.

Magnetische energie
Het zal nu wel zonder nadere toelichting duidelijk zijn dat ook in een magnetisch veld energie aanwezig is, die 'magnetische energie' wordt genoemd.

Chemische energie
Als u in een ballon een mengsel van waterstof en zuurstof mengt, gebeurt er verder niets. Brengt u nu echter een klein vonkje in dit mengsel, dan zal de ballon ontploffen, waarbij warmte vrij komt. Die warmte is thermische energie en die moet ergens vandaan komen. In het gasmengsel is 'chemische energie' aanwezig is.

De grootheid vermogen

Arbeid per tijdseenheid
Alweer een begrip dat voortdurend in allerlei verbanden gebruikt wordt. Men spreekt immers van lampen die een bepaald vermogen verbruiken en zonnecellen die vermogen kunnen leveren. Volgens de mechanica is vermogen, met als symbool P, niets anders dan de arbeid, die per eenheid van tijd geleverd wordt. Wiskundig:
$P = W / t$
De eenheid van vermogen is dus joule per seconde (J/s), maar in het spraakgebruik spreekt men van watt (W).

Overzicht

Misschien duizelt het u inmiddels een beetje. In onderstaande tabel wordt een overzicht gegeven van alle behandelde grootheden, hun symbolen in formules, hun eenheden, de afkorting van de eenheden en eventuele formules.

Grootheid	Symbool	Eenheid	Afkorting	Formule
Lengte	s	meter	m	
Massa	m	kilogram	kg	
Tijd	t	seconde	s	
Snelheid	v	meter per seconde	m/s	$v = s/t$
Versnelling	a	meter per seconde kwadraat	m/s²	$a = v/t$
Kracht	F	newton	N	$F = m \times a$
Arbeid	W	joule	J	$W = F \times s$
Energie	W, E	joule	J	
Vermogen	P	watt	W	$P = W/t$